



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# MATEMATICKÝ MODEL OVLÁDACÍHO MECHANISMU TURBODMYCHADLA

THE MATHEMATICAL MODEL OF THE OPERATING MECHANISM FOR TURBOCHARGERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. JÁN JAKUBEC

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. LUBOR ZHÁŇAL

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2012/13

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Ján Jakubec

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Matematický model ovládacího mechanismu turbodmychadla**

v anglickém jazyce:

### **The mathematical model of the operating mechanism for turbochargers**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní diplomové práce je vytvoření analytického matematického modelu popisujícího kinematiku mechanismu pro nastavování rozváděcích lopatek turbodmychadla a analýza vlivu vůlí mezi jednotlivými členy na jeho chování.

Cíle diplomové práce:

- vytvořit analytický model kinematiky mechanismu ovládní natáčivých lopatek s lineárním aktuátorem včetně jednoduchého uživatelského rozhraní, tak aby šel velmi jednoduše geometricky definovat, výstupem by měly být interní síly a přenosové funkce v mechanismu
- za použití tohoto modelu zpracovat citlivostní analýzu mechanismu na variace přenosové funkce s ohledem na stupeň opotřebení v jednotlivých uzlech mechanismu
- optimalizovat daný mechanismus pro dané zástavbové rozměry a daný rozsah pohybu aktuátoru pro dosažení minimálního mechanického namáhání a minimálních ztrát

Seznam odborné literatury:

- RAUSCHER, K. Spalovací motory. VUT Brno, 1996 (elektronický text).
- KOŠTÁL, J. - SUK, B. Pístové spalovací motory. SNTL Praha, 1973.
- VLK, F. Vozidlové spalovací motory. Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2001, Brno.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Lubor Zháňal

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 21.11.2012



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan



## ABSTRAKT

Diplomová práca je zameraná na vytvorenie matematického modelu kinematiky ovládacieho mechanizmu turbodúchadla DAVNT (Double-Axle Variable Nozzle Turbine) pre nastavovanie polohy lopatiek. Práca obsahuje krátky prehľad preplňovania a typov turbodúchadiel. Hlavná časť obsahuje matematický model, ktorý skúma správanie mechanizmu pri uvažovaní opotrebenia medzi jednotlivými členmi. Súčasťou je aj hodnotenie zmeny jednotlivých častí v uzloch mechanizmu spôsobených opotrebením a ich vplyv na mechanizmus vzhľadom k dôležitým parametrom charakterizujúcich mechanizmus. Hodnotenie je doplnené optimalizáciou parametrov. Záverečná časť obsahuje výpočet interných statických síl a hodnotenie umiestnenia aktuátora s ohľadom na zaťaženie mechanizmu.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

turbodúchadlo, DAVNT, lopatky, opotrebenie, citlivostná analýza, interné sily

## ABSTRACT

The Diploma Thesis is focused to create the mathematical model of operating kinematic model for turbocharger DAVNT (Double Axle Variable Nozzle Turbine) for setting the position of vanes. The work contains a brief overview of supercharge and types of turbochargers. The main part contains a mathematical model which examines the behavior of the mechanism with considering of wear among the parts. It also includes assessment of changing in various parts of the nodes caused by mechanism wear and their influence on the mechanism due to important parameters which characterizes the mechanism. The evaluation is completed by optimizing the parameters. The final section contains the static calculation of internal forces and assessment of actuator position relative to mechanism load.

## KEYWORDS

turbocharger, DAVNT, vanes, wear, analysis of sensitivity, internal forces



## BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

JAKUBEC, J. *Matematický model ovládacího mechanismu turbodmyhadla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lubor Zháňal.



## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojim pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Radka Jandoru, Ph.D. (Simulation Engineer v spoločnosti Honeywell Turbo Technologies v Brne), Ing. Lubora Zháňala (Ústav automobilního a dopravního inženýrství, Fakulta Strojního Inženýrství, Vysoké Učení Technické v Brně) a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 24. mája 2013

.....

Ján Jakubec



## POĎAKOVANIE

Chcel by som poďakovať všetkým, ktorí mi pri tvorbe tejto práci pomohli. V prvom rade vedúcemu práce Ing. Radkovi Jandorovi, Ph.D. za čas a cenné rady, vďaka ktorým táto práca vznikla. Poďakovanie patrí aj môjmu vedúcemu práce na akademickej pôde, Ing. Luborovi Zháňalovi, za usmerňovanie pri tvorbe a zdokonaľovaní programu. Za pohľad do sveta kvality a štatistiky ďakujem kolegovi Marekovi Novotnému. Poďakovať by som sa chcel aj rodine a najbližším za trpezlivosť a podporu.



**Ústav automobilného  
a dopravného inžinýrství**

**Honeywell**



## OBSAH

Úvod .....	10
1 Preplňovanie spaľovacích motorov .....	12
1.1 Parametre pre preplňovanie - zvýšenie efektívneho výkonu .....	13
1.1.1 Súčiniteľ prebytku vzduchu .....	13
1.1.2 Hustota plniaceho vzduchu .....	14
1.1.3 Plniaca účinnosť motora .....	15
1.1.4 Indikovaná účinnosť .....	15
1.1.5 Mechanická účinnosť .....	16
2 Turbodúchadlo .....	17
2.1 Konštrukcia turbodúchadla .....	18
2.1.1 Kompresorová časť .....	19
2.1.2 Ložisková časť .....	19
2.1.3 Turbínová časť .....	20
3 Turbodúchadlo s reguláciou preplňovania .....	22
3.1 Turbodúchadlo s premennou geometriou turbíny .....	22
3.1.1 Zmena šírky statoru turbíny .....	22
3.1.2 Natáčanie smerovou klapkou .....	23
3.1.3 Natáčanie lopatiek statoru .....	24
3.2 Porovnanie spôsobov regulovania .....	25
Záver .....	27
Zoznam použitých skratiek a symbolov .....	30





## Úvod

Diplomovú prácu som vytvoril v spolupráci s vývojovým centrom firmy Honeywell Turbo Technologies v Brne. Mala by pomôcť pri hľadaní ciest a riešení v skúmaní a zdokonaľovaní techniky turbodúchadiel.

Výrobcovia motorov sú povinný splňovať stále zvyšujúce sa požiadavky na emisie vytvárané ich motormi a trh si žiada stále vyššie a vyššie nároky na výkon. Splnenie týchto dvoch požiadaviek si vyžaduje zásahy pri tvorbe motorov a snahu o vývoj dokonalejších motorov. Jedným z riešení ako splniť tieto nároky je použitie turbodúchadla. Jeho princíp je vysvetlený v 1. a 2. kapitole. Turbodúchadlo dokáže doplniť do valcov viac vzduchu ako len samostatným nasávaním, a tým aj viac paliva. To sa nazýva preplňovanie. Viac vzduchu zvýši tlak a pri spálení potrebného množstva paliva sa získa vyšší výkon. Turbodúchadlo s reguláciou preplňovania dokáže ovládať množstvo vzduchu, ktoré si motor vyžaduje a následne dokáže lepšie určiť potrebné množstvo paliva.

Tabuľka 1 Emisné normy EURO [30]

Rok/norma		CO (g/km)		NO <sub>x</sub> (g/km)		HC + NO <sub>x</sub> (g/km)		HC (g/km)	PČ (g/km)
1992	I	3,16	3,16	-	-	1,13	1,13	-	0,18
1996	II	2,20	1,00	-	-	0,50	0,70*	-	0,08**
2000	III	2,30	0,64	0,15	0,50	-	0,56	0,20	0,05
2005	IV	1,00	0,50	0,08	0,25	-	0,30	0,10	0,025
2009	V	1,00	0,50	0,06	0,18	-	0,23	0,10	0,005
2014	VI	1,00	0,50	0,06	0,08	-	0,17	0,10	0,005

**BENZÍNOVÉ MOTORY, NAFTOVÉ MOTORY**

\* 0,90 pro motory s přímým vstřikovaním paliva

\*\* 0,10 pro motory s přímým vstřikovaním paliva

Turbodúchadlo DAVNT obsahuje zložitý mechanizmus ovládania, ktorý ovláda preplňovanie pomocou úpravy rýchlosti spalín, ktoré poháňajú turbínové koleso. Mechanizmus je zložený z viacerých častí, ktoré pracujú v teplotne náročných podmienkach. Spaliny silovo zaťažujú lopatky, na ktoré pôsobia a taktiež zanášajú mechanizmus sadzami. Tieto vplyvy nepriaznivo pôsobia na mechanizmus, ktorý má vykazovať veľkú presnosť pri jeho činnosti.

Koncepcia ovládania regulácie turbodúchadla je vďaka ich konkurencie schopných výhod v súčasnosti trendom, ktorým sa uberajú výrobcovia turbodúchadiel. Snaha je zdokonaľiť tento mechanizmus z hľadiska spoľahlivosti a citlivosti na ťažké podmienky, v ktorých pracuje.

Proces, ktorým som postupoval je naznačený v tejto animácii.



Graf 1 Proces práce



V prvej časti práce som sa venoval matematickému definovaniu celého mechanizmu, ktorý som následne aplikoval pre konkrétny typ turbodúchadla. Potrebné rozmery súčastí som získal z výkresovej dokumentácie a dopĺňujúce hodnoty z pripraveného 3D modelu v programe CATIA V5. V prostredí programovacieho programu som vytvoril jednoduché užívateľské rozhranie, ktoré pomáha jednoducho zadať základné rozmery pre výpočet.

Výstupom naprogramovaného matematického modelu je súbor hodnôt sledovaných parametrov pri pohybe lopatiek z plne otvorenej do plne zatvorenej polohy. Pohyb je uvažovaný so zmenou parametrov častí v jednotlivých uzloch mechanizmu. Cieľom je zistenie vplyvu zmeny parametrov na kinematiku mechanizmu. Pre toto zistenie vplyvu zmien som dáta vložil do štatistického programu Minitab. Ten určil na základe všetkých zmien parametrov ako sa tieto zmeny správajú na sledované parametre, ktoré je dôležité dodržiavať. Minitab na základe všetkých zmien faktorov a zadaní potrebných hodnôt, ktoré je potrebné sledovať, určil optimálne hodnoty parametrov vzhľadom na minimálne straty v prúdeňí spalín.

Posledným krokom je definovanie interných síl pôsobiacich na mechanizmus (bez uvažovania trenia) a určenie optimálnych zástavbových rozmerov pre dosiahnutie dobrej ovládateľnosti a namáhania mechanizmu.

Z dôvodu utajenia informácií sú z plnej verzie vymazané kapitoly od čísla 5 - 9.



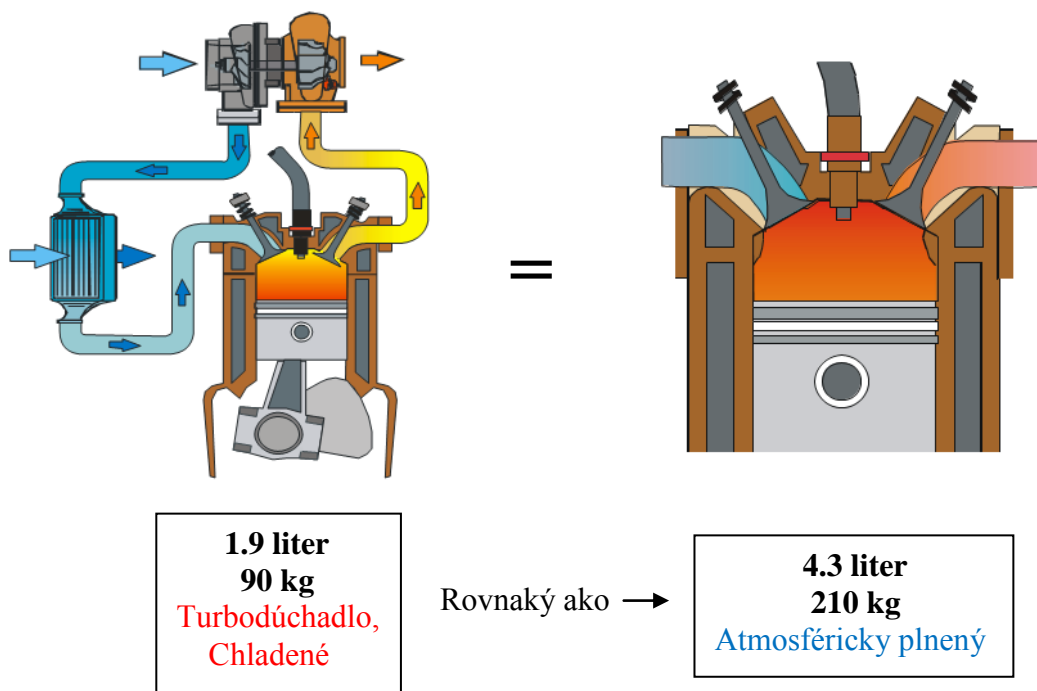
# 1 PREPLŇOVANIE SPALŇOVACÍCH MOTOROV

Prakticky neoddeliteľnou časťou vo vývoji moderných spalovacích motorov je princíp ich preplňovania. Dôvodom je zlepšenie výkonnostných, ekologických a ekonomických parametrov motora. Preplňovaním sa dokáže dodať motoru pri jeho pracovnom obehú viac potrebného vzduchu do valca, a to umožňuje zvýšiť dodané množstvo paliva. Vďaka tomu bude energia paliva efektívnejšie premenená na energiu mechanickú (zvýšenie účinnosti motora). Spalovanie závisí na pomere objemu zmesi vzduchu a paliva vo valci. Pre dokonalé spalovanie sa tento zmiešavací pomer nazýva stechiometrický pomer, v ktorom platí, že na 14,7 kg vzduchu (pre vznietové motory 14,5 kg) je potrebný 1 kg paliva. Týmto spôsobom sa získa vyšší točivý moment a výkon pri nižšej mernej spotrebe paliva a tým aj nižšími emisiami, na ktoré aj spolu so spotrebou paliva je v dnešnej dobe kladený veľký dôraz. Točivý moment získa lepší priebeh a vyššiu hodnotu v nízkych otáčkach.

Preplňovanie je jedným zo základných faktorov pri trende znižovania zdvihového objemu nazývaného „Downsizing“. Podstata je nahradenie motora s atmosférickým plnením, motorom preplňovaným s podstatne nižším zdvihovým objemom pre dosiahnutie rovnakých alebo vyšších výkonnostných parametrov. Menšími rozmermi motora získame nižšiu hmotnosť, menšie kontaktné plochy súčastí (menšie trecie odpory) a menší odpor zotrvačnosti. To vplýva na zvýšenie účinnosti motora a v konečnom dôsledku na spotrebu. [1] [2] [9] [10]

Rozdelenie podľa spôsobov preplňovania:

- mechanický kompresor
- turbodúchadlo
- kombinácia mechanického kompresoru a turbodúchadla
- iné druhy.



Obrázok 1 Porovnanie preplňovaného (vľavo) a atmosférického motora (vpravo) [4]



## 1.1 PARAMETRE PRE PREPLŇOVANIE - ZVÝŠENIE EFEKTÍVNEHO VÝKONU

Hlavným parametrom pre preplňovanie je efektívny výkon motora. Zvýšenie sa dá dosiahnuť úpravou viacerých parametrov, ktoré sú uvedené v rovnici na výpočet efektívneho výkonu motora  $P_e$ : [1] [2]

$$P_e = iV_H p_e \frac{n}{\tau} \quad [\text{W}] \quad (1)$$

Zo vzťahu na efektívny výkon pri zachovaní konštrukčného riešenia motora sa pri preplňovaní zohľadňuje skutočnosť, že k väčšiemu množstvu paliva je potrebné dodať aj viac vzduchu a to ovplyvňuje zvýšenie stredného indikovaného tlaku na piest  $p_e$ : [1] [2]

$$p_e = \frac{H_u}{\sigma_t \lambda_Z} \rho_{pl} \eta_{pl} \eta_i \eta_m \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

Dolná výhrevnosť paliva  $H_u$  a teoretický zmiešavací pomer  $\sigma_t$  budú konštantné, tak hodnotu stredného indikovaného tlaku je možné zvýšiť týmito piatimi parametrami: plniacou účinnosťou motora  $\eta_{pl}$ , veľkosťou prebytku vzduchu  $\lambda_Z$ , hustotou plniaceho vzduchu  $\rho_{pl}$ , indikovanou účinnosťou motora  $\eta_i$  a mechanickou účinnosťou motora  $\eta_m$ . Zvyšovanie stredného efektívneho tlaku je u zážihových motorov obmedzené detonačným spaľovaním. Medza detonačného spaľovania sa dá posunúť konštrukčným znížením kompresného pomeru, znížením predstihu zážihu, chladičom plniaceho vzduchu, palivom s vyšším oktánovým číslom, zvýšenými otáčkami motora a ďalšími faktormi. [1] [2] [6] [7]

### 1.1.1 SÚČINITEL PREBYTKU VZDUCHU

Súčiniteľ prebytku vzduchu  $\lambda$  je pomer množstva vzduchu, ktorý je do spaľovacieho priestoru skutočne dodaný  $M_l$  ku množstvu vzduchu, ktorý je teoreticky potrebný  $M_{lo}$ . V niektorých literatúrach je uvádzaný aj ako *vzduchový súčiniteľ* a je daný vzťahom:

$$\lambda = \frac{M_l}{M_{lo}} \quad [-] \quad (3)$$

Pri stechiometrickej zmesi je  $\lambda = 1$ . To znamená, že pre spálenie 1 kg paliva sa využije 14,7 kg vzduchu (dokonalé spaľovanie). Pri prebytku vzduchu a nedostatku paliva platí  $\lambda > 1$  a jedná sa o *chudobnú zmes*. Ak platí  $\lambda < 1$ , tak nastáva stav nedostatku vzduchu a prebytok paliva. To sa nazýva *bohatá zmes*. [10]

U preplňovaných motorov súčiniteľ prebytku vzduchu ovplyvňuje stredný efektívny tlak len nepriamo. Berie sa ohľad na skutočnosť preplachovania spaľovacieho priestoru pri prekrížení ventilov, a preto sa súčiniteľ prebytku vzduchu rozdeľuje na spaľovací súčiniteľ prebytku vzduchu  $\lambda_Z$  a preplachovací  $\lambda_{pr}$ .

$$\lambda = \lambda_Z + \lambda_{pr} \quad [-] \quad (4)$$

Pre rast  $\lambda$  alebo  $\lambda_Z$  sú dôležité tieto podmienky:

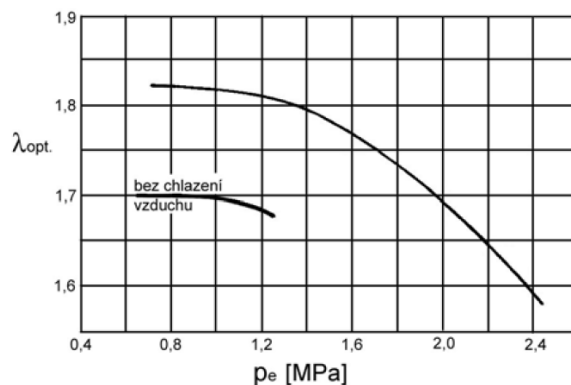
- $\lambda_Z$  bude rásť pri zvyšovaní stredného indikovaného tlaku  $p_e$ , ak sa bude zvyšovať aj indikovaná účinnosť  $\eta_i$ ,



- súčiniteľ prebytku vzduchu  $\lambda$  slúži aj ako regulačný činiteľ pre množstvo energie výfukových plynov pred turbínou,

$$\lambda(T_V - T_{pl}) = konst. \quad (5)$$

- spaľovacím súčiniteľom prebytku vzduchu sa kontroluje maximálna hodnota spaľovacích teplôt z dôvodu regulácií tepelného namáhania dielov motora. Súčiniteľ prebytku vzduchu je ten najdôležitejší faktor pre ovládanie teplotného spádu medzi plynmi a stenami valcov. [1] [2]



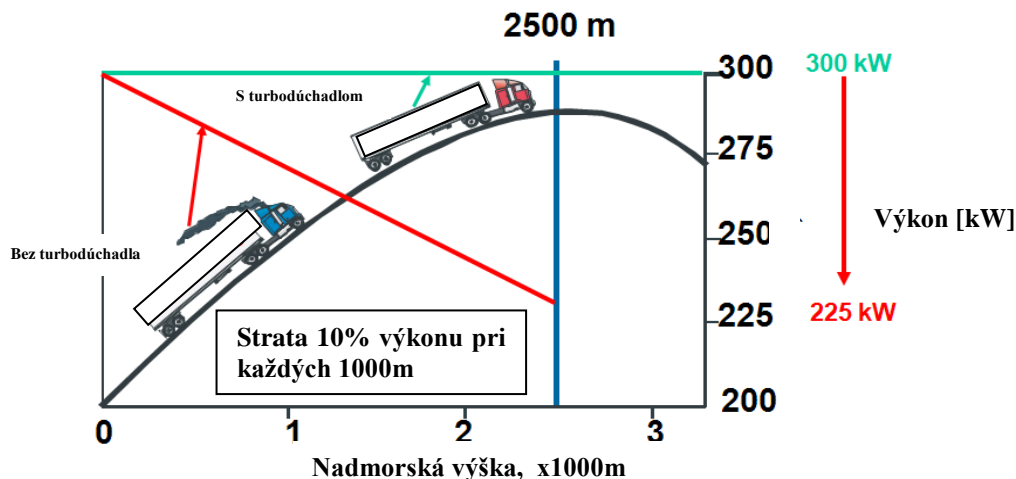
Graf 2 Závislosť súčiniteľa prebytku vzduchu na strednom indikovanom tlaku [3]

### 1.1.2 HUSTOTA PLNIAČEHO VZDUCHU

Hustota plniaceho vzduchu  $\rho_{pl}$ , ktorá vychádza zo stavovej rovnice je daná vzťahom:

$$\rho_{pl} = \frac{p_{pl}}{rT_{pl}} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (6)$$

Zo vzorca vyplýva, že hustotu dokážeme zvýšiť zväčšením tlaku a ochladením plniaceho vzduchu. Pri atmosféricky plnených motoroch vplyva na hustotu plniaceho vzduchu aj nadmorská výška, čo sa prejaví na výkone vozidla. Tento nedostatok odstraňujú preplňované motory s turbodúchadlami ako je znázornené v grafe 3. [1][2][4]



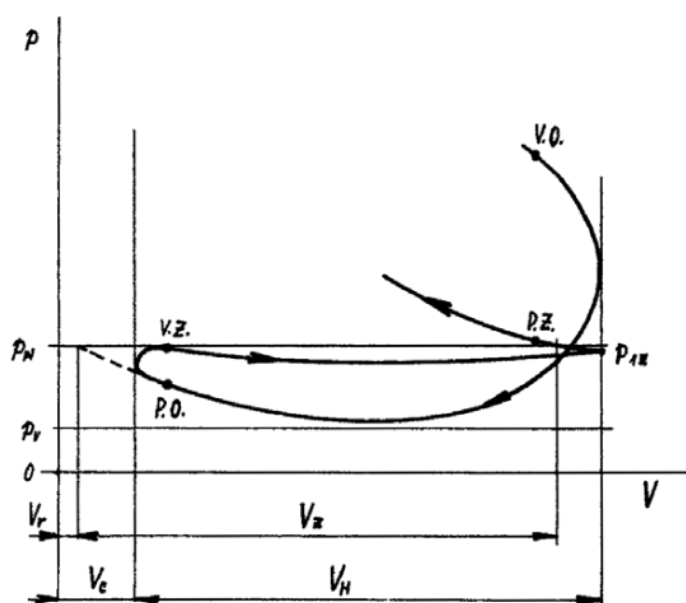
Graf 3 Vplyv nadmorskej výšky na výkon motora [4]

### 1.1.3 PLNIAKA ÚČINNOSŤ MOTORA

Plniaca účinnosť motora  $\eta_{pl}$  zo vzťahu pre stredný indikovaný tlak je daná vzťahom:

$$\eta_{pl} = \frac{m_z}{V_H \rho_{pl}} = \frac{V_z T_{pl} p_{1z}}{V_H T_{1z} p_{pl}} \quad [-] \quad (7)$$

Je to pomer hmotnosti náplne  $m_z$  za stavu na konci plnenia  $p_{1z}$ ,  $T_{1z}$  k hmotnosti, ktorá by bola vo valci pri ideálnom plnení behom sacieho cyklu  $V_H \rho_{pl}$  (stav vzduchu pred plniacim ventilom  $p_{pl}$ ,  $T_{pl}$ ). Plniaci tlak  $p_{pl}$  je vyšší ako tlak výfukových plynov  $p_v$ . Na rozdiel od atmosféricky plnených motorov vzniká u preplňovaných motorov pozitívna plocha v pracovnom P-V diagrame. [1] [2]



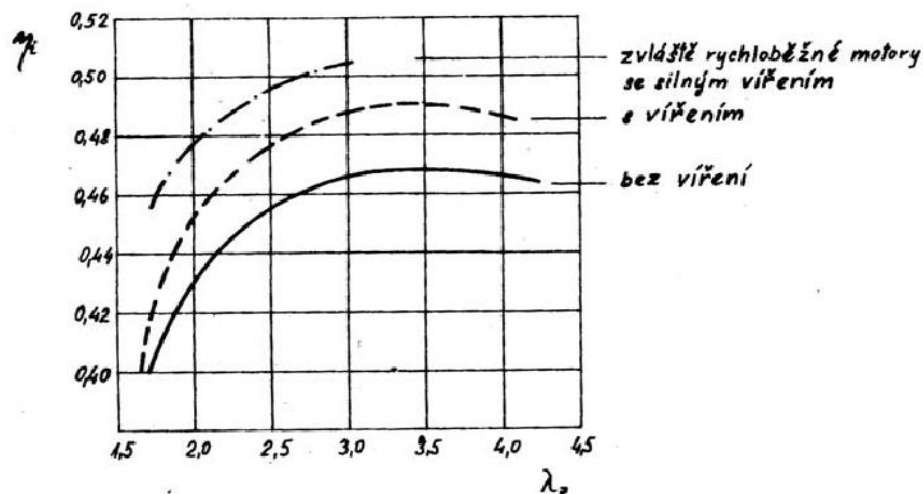
Graf 4 Výmena náplne valca preplňovaného motora [2]

### 1.1.4 INDIKOVANÁ ÚČINNOSŤ

Indikovaná účinnosť  $\eta_i$  vyjadruje mieru využitia energie privedenej z paliva a závisí aj na súčiniteli prebytku vzduchu  $\lambda_z$ . Pre indikovanú účinnosť platí vzťah:

$$\eta_i = \frac{Q_i}{Q_p} = \frac{V_H p_i}{M_{pl} H_u} = \frac{p_i \sigma_t \lambda_z}{H_u \rho_{pl} \eta_{pl}} \quad [-] \quad (8)$$

V grafe 5 je znázornená závislosť indikovanej účinnosti na súčiniteli prebytku vzduchu, z ktorej vyplýva, že najväčšia indikovaná účinnosť je dosahovaná pri hodnote  $\lambda_z = 3,5$ . Po dosiahnutí tejto hodnoty začína klesať. Na hodnotu indikovanej účinnosti má vplyv aj intenzita rozvírenia vzduchu vo valci. [2]



Graf 5 Indikovaná účinnosť vznetového motora [2]

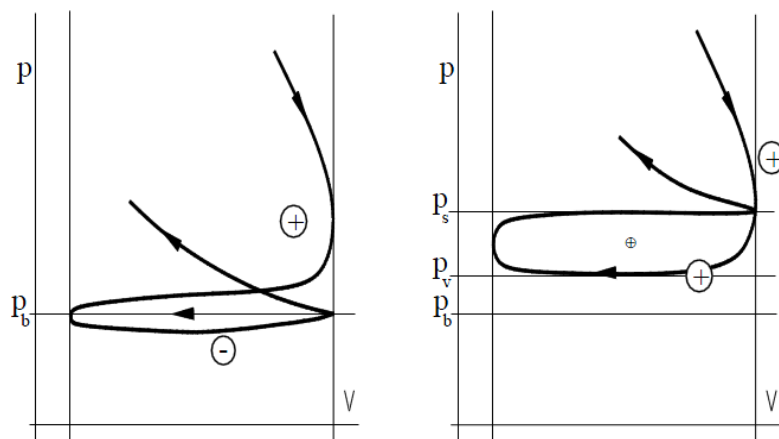
### 1.1.5 MECHANICKÁ ÚČINNOSŤ

Mechanická účinnosť je daná vzťahom:

$$\eta_m = \frac{p_e}{p_i} = \frac{p_i - p_m}{p_i} \quad [-] \quad (9)$$

Mechanická účinnosť  $\eta_m$  je závislá na mechanických stratách, ktoré delíme na:

- Straty spôsobené odoberaním výkonu motora na pohon pomocných agregátov (mazacie a chladiace čerpadlo, vstrekovacie zariadenie, elektrický generátor), straty od zotrvačných síl, pohon rozvodov a ventilačné straty. Tieto straty sa pri preplňovaní nebudú strácať.
- Straty spojené so zaťažením motora, ako trecie straty meniace sa s tlakom plynov na piest. Hodnota strát sa bude zvyšovať s rastom stupňa preplňovania.
- Straty pri výmene náplne. U preplňovaných štvordobých motorov klesajú straty do záporných hodnôt, pretože spodná časť P-V diagramu je kladná. Pri dvojdobých motoroch, kde pracuje turbodúchadlo spolu s mechanicky poháňaným vyplachovacím dúchadlom sa tieto straty znižujú podľa druhu preplňovania (graf 6). [2]



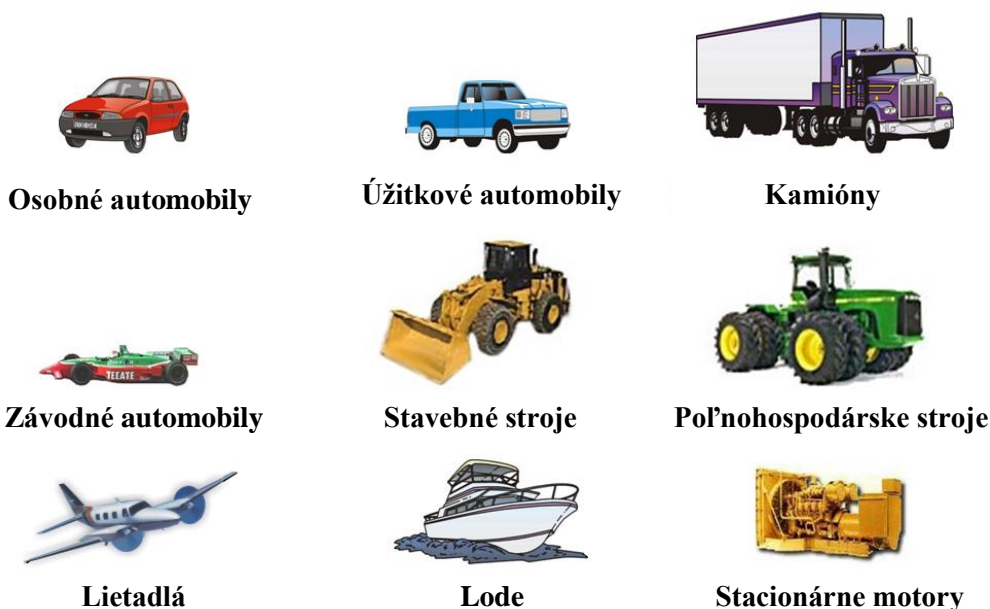
Graf 6 Výmena náplne valca atmosférického (vľavo) a preplňovaného motora (vpravo) [3]





## 2 TURBODÚCHADLO

Jedným zo spôsobov ako dosiahnuť preplňovanie u spaľovacích motorov je použitie turbodúchadla. Toto zariadenie pracuje na podobnom princípe ako mechanický kompresor, s výnimkou, že nie je poháňané mechanicky od kľukového hriadeľa, ale výfukovými plynmi. Turbodúchadla sa zo začiatku používali iba na naftových motoroch, no v súčasnosti ich nájdeme aj na benzínových z dôvodu zvyšovania nárokov na emisné požiadavky. Slúžia aj ako motorové brzdy, ktoré pomáhajú pri spomalení vozidla. Ich široké využitie je znázornené na obrázku 2. Nevýhoda turbodúchadla je pri nižších otáčkach motora, kedy výfukové plyny majú malú kinetickú energiu, neroztočia turbodúchadlo dostatočne na to, aby dopravilo požadovaný vzduch do motora. Tento dej je známy pod názvom „turboefekt“. Turboefekt sa dá čiastočne eliminovať znížením rotačnej zotrvačnosti turbíny (menšia hmotnosť alebo polomer), vstreknutím paliva do výfukového potrubia (závodné vozidlá) alebo reguláciou výfukových plynov. Pre turbínu je potrebné nájsť kompromis medzi hmotnosťou a veľkosťou. Silnejšie materiály sú odolnejšie, ale ťažšie, na druhej strane malé kolesá sa rýchlo roztočia ale neprenesú dostatočný prietok vzduchu. [5] [6] [7] [25]

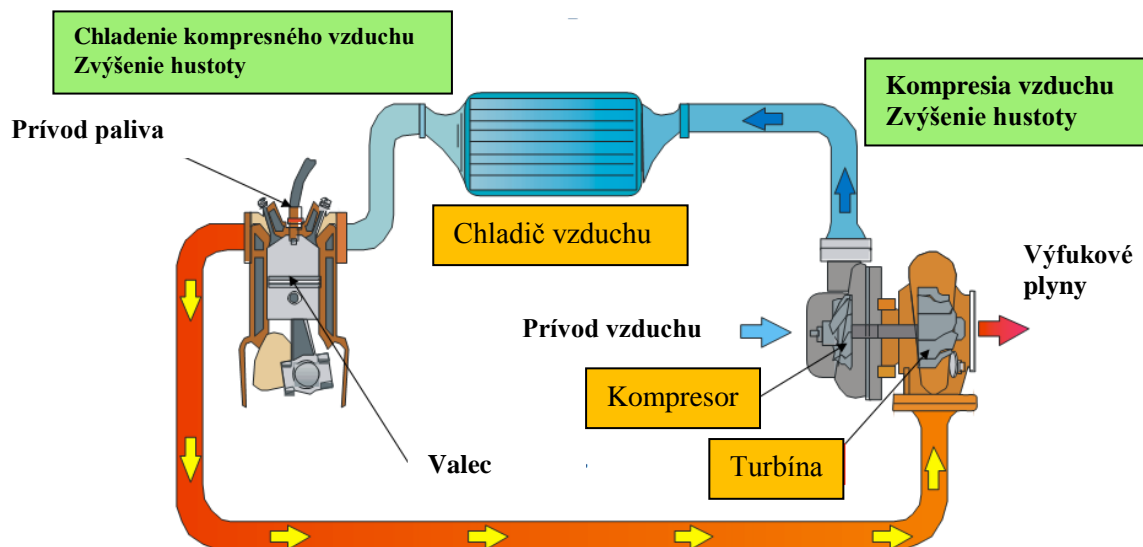


Obrázok 2 Možnosti použitia turbodúchadla [8]

Turbína a kompresor sú umiestnené na jednom hriadeľi, takže spolu s roztočením turbínového kolesa sa roztočí aj to kompresorové. Kompresorové koleso axiálne nasáva vzduch z okolia, ktorý prúdi do kompresorovej skrine, kde sa zvyšuje jeho tlak a hustota. Pri tomto stlačovaní vzduchu sa zvyšuje aj jeho teplota, čo je nepriaznivý efekt, ktorý vplýva na hustotu vzduchu. Čím je vzduch teplejší, tým je jeho hustota menšia. Preto sa medzi turbodúchadlo a motor dáva medzichladič, ktorý chladí vzduch a tým zvýši jeho hustotu. Vzduch je následne vháňaný do valca motora, kde spolu s palivom vytvorí zápalnú zmes. Turbodúchadlo dokáže natlačiť za rovnakú jednotku času viac vzduchu do valca ako motor bez preplňovania, a to znamená, že pri väčšom objeme vzduchu sa môže vstrieкнуť viac paliva do valca, a tým sa zvýši výkon a aj účinnosť motora. Spálená zmes prúdi potrubím pod tlakom vyšším ako je atmosférický tlak do turbínovej skrine, kde prúd spalín roztáča turbínu a tento dej sa znovu opakuje. Spaliny ďalej prúdia do výfukového potrubia. Cieľom je dosiahnuť rovnováhu medzi množstvom vzduchu a paliva vo valci, pre získanie správnej teploty výfukových plynov, teda



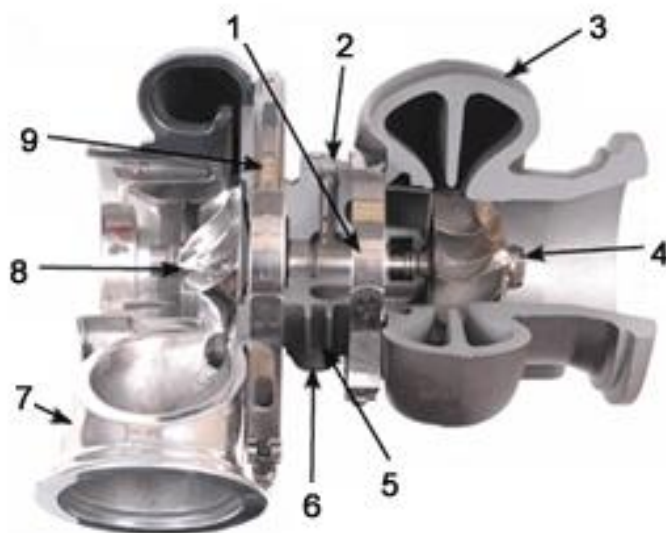
energiu pre turbínu. Tlak za turbínou vo výfukovom systéme je nazývaný protitlak. Má negatívny vplyv na účinnosť motora, čo vplýva na spotrebu paliva, preto je cieľom dosiahnuť jeho najmenšiu hodnotu. [4]



Obrázok 3 Schéma zapojenia turbodúchadla na motore [4]

## 2.1 KONŠTRUKCIA TURBODÚCHADLA

Turbodúchadlo je zložené z troch základných častí: **turbínová časť**, **ložisková časť** a **kompresorová časť**. Každá z týchto troch častí je zložená z ďalších komponentov, ktoré sú znázornené na obrázku 4.

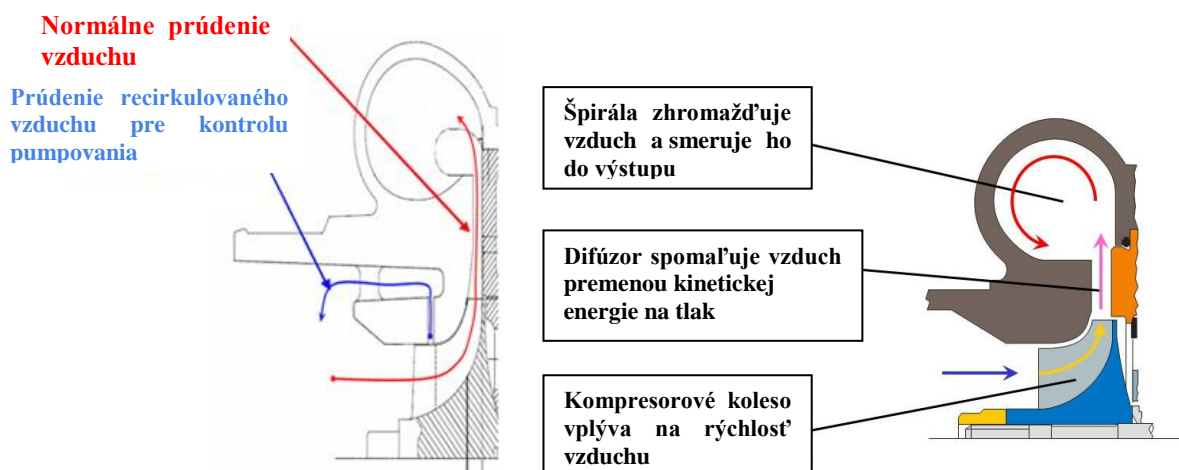


Obrázok 4 Rez turbodúchadlom [12]

1 – ložisko, 2 – vstupný olejový kanál, 3 – turbínová skriňa, 4 – turbínové koleso, 5 – ložisková skriňa, 6 – výstupný olejový kanál, 7 – kompresorová skriňa, 8 – zadná stena kompresorovej skrine

### 2.1.1 KOMPRESOROVÁ ČASŤ

Kompresorová strana je zložená z kompresorovej skrine v tvare špirály a z kompresorového kolesa, ktoré je vo väčšine prípadov vyrobené z hliníkovej zliatiny a jeho lopatky sú prispôbené na čo najlepšie vháňanie vzduchu do difúzora. Koleso nasáva axiálne vzduch z okolia a zvyšuje jeho kinetickú energiu. Vzduch prechádza do difúzora, v ktorom nastáva premena kinetickej energie na zvýšenie tlaku a teploty vzduchu. Časť kompresoru je pri kolese v niektorých prípadoch upravená tak, aby bola oddialená medza pumpovania pomocou recirkulácie vzduchu (obrázok 5). Za touto medzou klesá účinnosť stlačovania vzduchu, obracia sa zmysel prúdenia vzduchu a vznikajú rázy v saní. [1] [4]

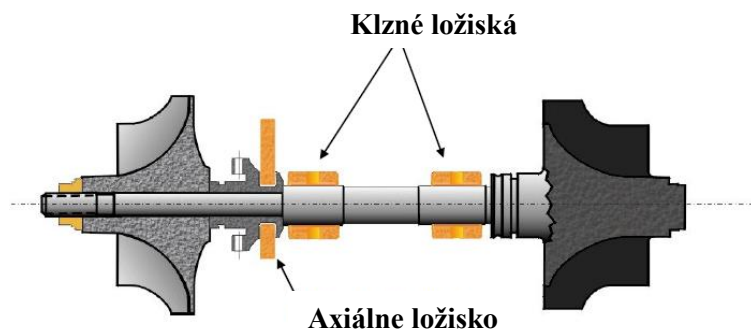


Obrázok 5 Recirkulácia vzduchu [11]

Obrázok 6 Prúdenie vzduchu v kompresorovej skrini [4]

### 2.1.2 LOŽISKOVÁ ČASŤ

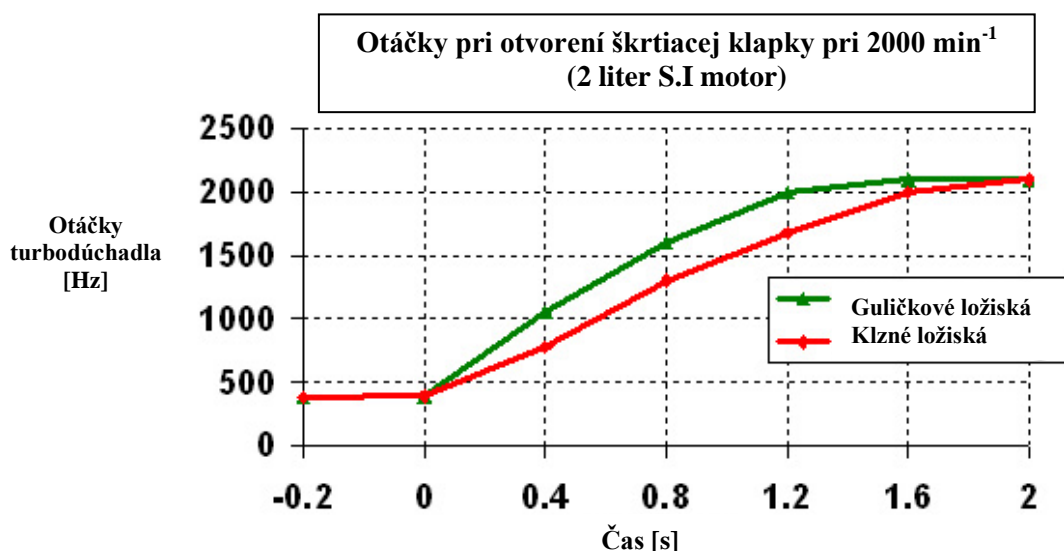
Centrálna ložisková časť v sebe nesie spojovací hriadeľ kompresorového a turbínového kolesa. Je k nej pripevnená kompresorová a turbínová skriňa. Telo ložiskovej časti je prispôbené k vedeniu oleja k ložiskám. Keďže turbínové koliesko dosahuje v najnovších turbodúchadlách rýchlosť až okolo 280 000 otáčok za minútu, tak je na ložiská a mazanie kladený veľký dôraz. Hriadeľ je uložený v klzných alebo valivých (guličkových) ložiskách. Valivé ložiská zaisťujú kosouhlý styk na oboch koncoch, takže ložisko splňuje úlohu radiálneho aj axiálneho ložiska na rozdiel od tradičných klzných ložísk, kde je potreba jedného radiálneho klzného a druhého axiálneho ložiska.



Obrázok 7 Ložiská [4]



V poslednej dobe sa začínajú vo väčšej miere používať valivé ložiská, ktoré s použitím dokonalejších materiálov majú menšiu hlučnosť, dlhšiu životnosť a menší odpor pri roztočení hriadeľa. Získa sa o 15% lepšie zrýchlenie turbodúchadla ako pri klzných ložiskách (graf 7). Ložisková časť môže byť chladená vzduchom alebo kvapalinou. Tesnosť celej časti je zaistená tesniacimi krúžkami, aby neunikalo médium do ďalších častí turbodúchadla a do centrálnej časti sa nedostávali nečistoty a vzduch. [4] [13] [14]



Graf 7 Vplyv ložísk na rýchlosť turbodúchadla [14]

### 2.1.3 TURBÍNOVÁ ČASŤ

Táto časť turbodúchadla je zložená z turbínovej skrine a turbínového kolesa, ktoré je napevno spojené zvarom s hriadeľom. Výfukové zvody, ktorými prúdia výfukové plyny sú spojené s turbínovou skriňou. Tieto plyny prúdia na turbínové koliesko, predávajú mu svoju kinetickú energiu a tým ho roztáčajú. Energia turbíny sa prenáša cez hriadeľ na kompresorové koliesko, ktoré nasáva vzduch z okolia. Výfukové plyny z turbíny následne prechádzajú do výfukového potrubia. Pri výrobe sa používajú vysokoteplotné odolné materiály, pretože teploty výfukových plynov dosahujú teploty okolo 850°C pri vznietovom motore a okolo 1000°C pri zážihovom motore. Turbínové koleso dosahuje v najnovších turbodúchadlách rýchlosť až okolo 280 000 otáčok za minútu. Súčasťou turbínovej skrine sú aj ovládacie prvky turbodúchadla- ventil „Wastegate“, ovládací mechanizmus VNT a ďalšie.

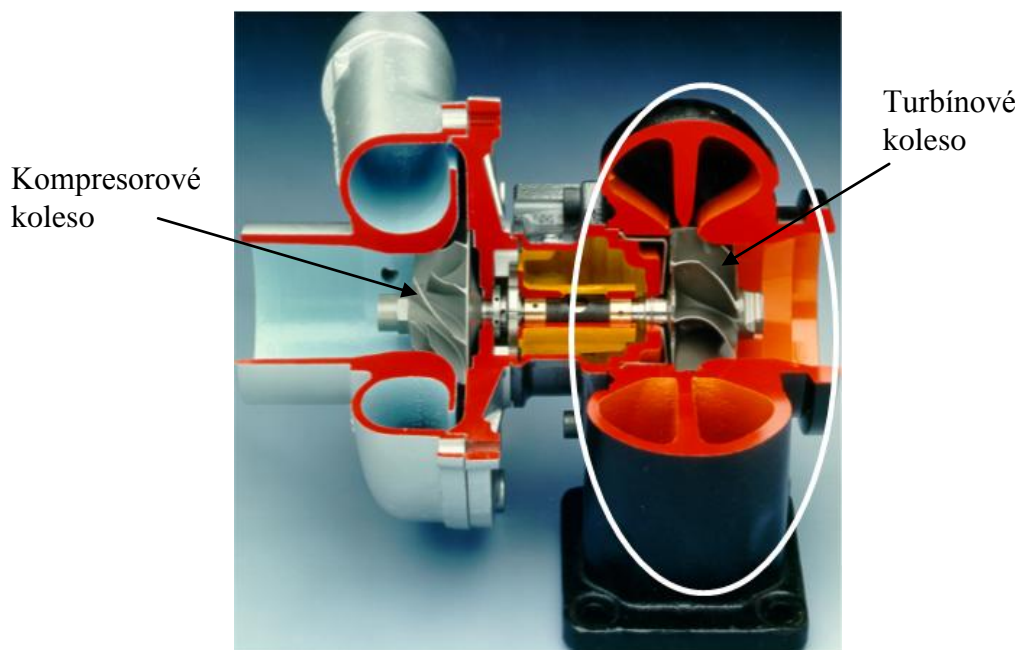
Preplňovanie výfukovými plynmi, ktoré prúdia do turbíny sa delí na: [4] [13] [15]

- **impulzné preplňovanie**

Pri tomto prevedení je snaha o zachovanie tlakových a teplotných impulzov, ktoré vznikajú pri vyfúknutí spalín cez výfukový ventil a privedenie k turbínovému kolesu. K tomu je aj prispôbená turbínová skriňa, ktorá má u viacvalcových motorov oddelené prívoody spalín, aby sa impulzy navzájom nerušili. Výfukové potrubie musí mať čo najkratšiu dĺžku a čo najmenší priemer, aby sa zachovali impulzy. Využíva sa to pri motoroch, ktoré sa prevádzkujú pri nižších otáčkach a zaťaženiach, pretože plyny majú pri týchto



charakteristikách väčšiu energiu ako pri rovnotlakom prevedení. Turbína má rýchlejšiu odozvu na zmenu zaťaženia. [1] [2]



Obrázok 8 Turbínová časť s turbínovým kolesom [4]

- **rovnotlaké preplňovanie**

Výfukové plyny prúdia z valcov s ustáleným tlakom a bez pulzácií. Vplyv na to majú výfukové zvody, ktoré majú väčší prierez, sú dlhšie a spojené do jedného potrubia, ktoré vedie do turbíny. Turbína nemá oddelené privody spalín, ale vnútro skrine je tvorené jednou komorou. Rovnotlaké preplňovanie sa využíva najmä u stacionárnych a lodných motorov, ktoré pracujú pri konštantných otáčkach a zaťaženiach. [1] [2]



Obrázok 9 Turbínová skriňa rovnotlakého preplňovania [16]



### 3 TURBODÚCHADLO S REGULACIOU PREPLŇOVANIA

Turbodúchadlo bez možnosti regulácie dokáže pracovať len pri konštantnom prúde vzduchu a tlakovom pomere. Pre zlepšenie ovládateľnosti preplňovania a získanie lepších charakteristík sa zavádza regulácia turbodúchadla. Regulácia je dôležitá pri zmene zaťaženia a otáčok motora, kedy sú potrebné rôzne tlaky plniaceho vzduchu. Regulácia taktiež vplyva na zvýšenie ochrany proti pretočeniu a preťaženiu, čo vedie k následnému zničeniu turbodúchadla. Vďaka regulácii sa môže turbodúchadlo naladiť na optimálnejšie parametre a dosiahnuť lepšej pružnosti a akcelerácie schopnosti. Regulácia dokáže eliminovať nedostatočný plniaci tlak  $p_{pl}$  v nízkych otáčkach (nazývaný pod pojmom „turboefekt“), zvýšiť stredný efektívny výkon  $P_e$ , krútiaci moment v nízkych otáčkach, znížiť spotrebu paliva a emisie, zlepšenie systému recirkulácie spalín EGR (Exhaust Gas Recirculation). Regulované preplňovanie má veľkú výhodu pri ovládateľnosti detonačného spaľovania zážihových motorov. Mechanizmy pre regulovanie sú súčasťou turbínovej skrine.

Turbodúchadlo je možné regulovať:

- odpúšťaním spalín z motora pred turbínou (Wastegate)
- premennou geometriou turbíny
  - zmenou šírky statoru turbíny
  - natáčaním smerovou klapkou
  - natáčaním lopatiek statoru
- pomocou elektrického pohonu

Regulovanie turbodúchadla sa delí aj podľa stupňa preplňovania na:

- jednostupňové preplňovanie
- dvojstupňové preplňovanie
- trojstupňové preplňovanie [2] [18] [22]

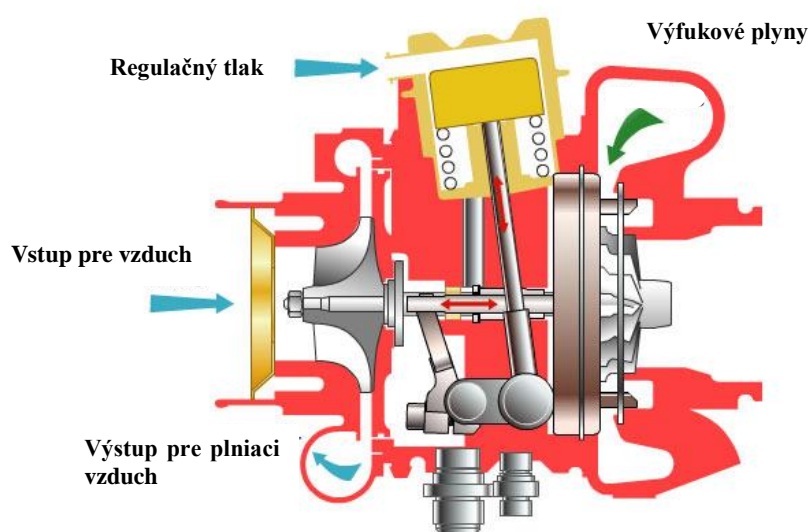
#### 3.1 TURBODÚCHADLO S PREMENNOU GEOMETRIOU TURBÍNY

Všeobecne sa v praxi turbodúchadlo s premennou geometriou turbíny nazýva VGT (Variable-Geometry Turbocharger).

##### 3.1.1 ZMENA ŠÍRKY STATORU TURBÍNY

Mechanizmus ovládania šírky statoru turbíny prvýkrát priniesla firma Holset. Princíp je na axiálnom posuve rozvádzajúceho kola s lopatkami, ktoré sa nenáčajú a uhol ich sklonu je optimálny pre nábeh plynov na turbínu. Mení sa iba aktívna šírka vstupu spalín do turbíny. Lopatky sa pri regulácii zasúvajú do steny na druhej strane. K ovládaniu sa používa piest, ktorý sa pohybuje v závislosti na tlaku vzduchu z brzdového systému vozidla. Snímanie plniaceho tlaku je realizované bezdotykovým snímaním otáčok turbodúchadla, ktorý je umiestnený v ložiskovej skrini. Spaliny pretekajú cez lopatky pri optimálnom uhle a to zabezpečuje stálu vysokú vnútornú účinnosť. Straty sú spôsobené len na statore a na náhlom rozšírení turbíny. Posunutím rozvádzacieho kola do otvoru turbínovej skrine sa zmenší vstupný prierez pre spaliny a to má za dôsledok zvýšenie rýchlosti prietoku výfukových plynov na turbínu, ktorá zvýši svoje otáčky. [2] [19]

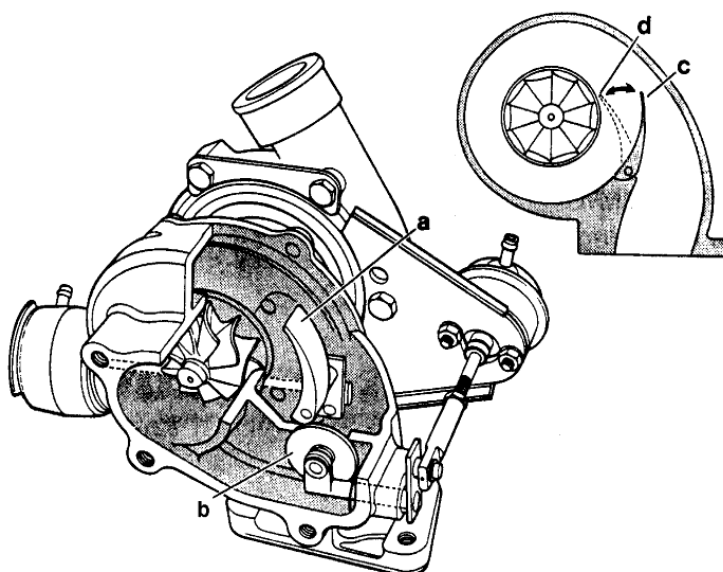




Obrázok 10 Turbodúchadlo s premenlivou šírkou satoru turbíny [19]

### 3.1.2 NATÁČANIE SMEROVOU KLAPKOU

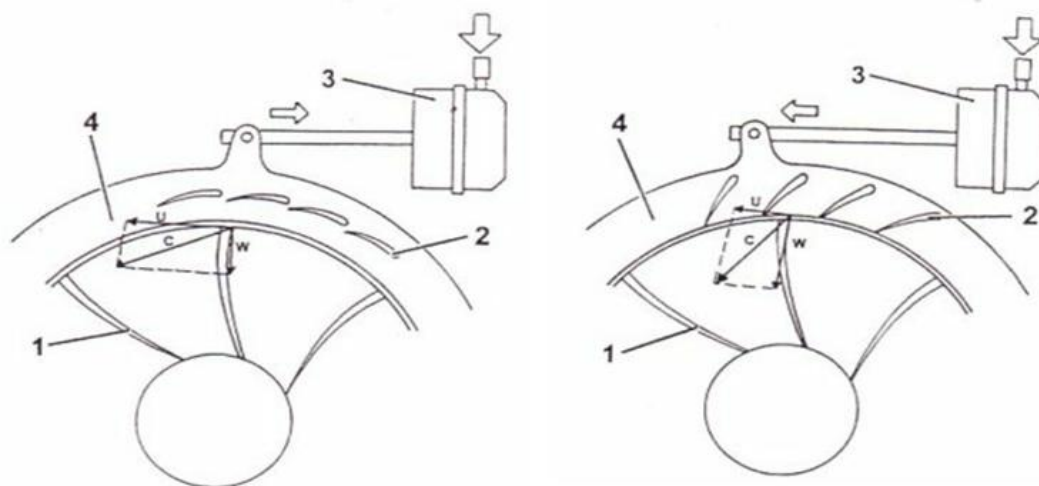
Turbodúchadlo môže využívať na svoju reguláciu smerovú klapku. Naklápaním tejto klapky sa reguluje prietochový prierez a tým aj rýchlosť výfukových plynov pôsobiacich na turbínu (od polohy c do polohy d na obrázku 11). Pri zmenšení prietochového prierezu sa zvyšuje rýchlosť prietoku spalín, čo má za následok zvýšenie plniaceho tlaku  $p_{pl}$ . Ovládanie zabezpečuje pneumatickým alebo elektromagnetickým ventilom. Tento systém môže byť doplnený o ventil „Wastegate“. Pri tejto kombinácii sa dosiahne rovnaký efekt ako pri použití natáčania lopatiek satoru. Tento typ je známy pod názvom Garrett VAT25. [2] [18]



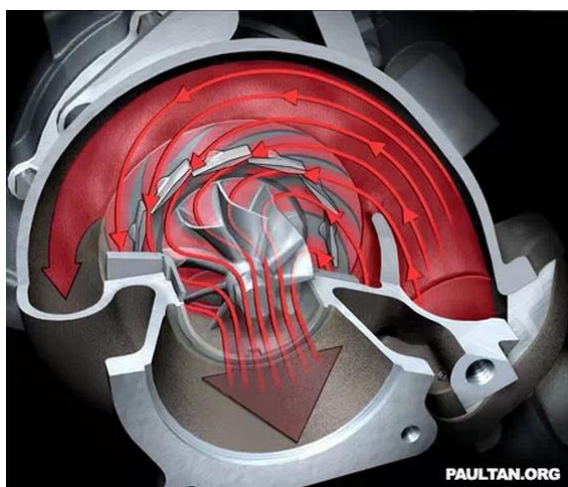
Obrázok 11 Turbodúchadlo Garrett VAT25 [2]

### 3.1.3 NATÁČANIE LOPATIEK STATORU

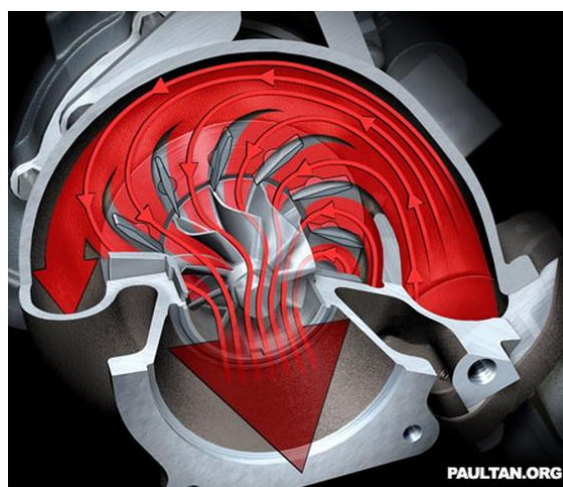
Toto riešenie je okrem všeobecného názvu VGT známe aj pod názvami VTG (Variable-Turbine Geometry) od firmy BorgWarner a VNT (Variable Nozzle Turbine) od Firmy Honeywell. Princíp je v naklápaní lopatiek na obode turbíny (pozícia 2), ktoré regulujú rýchlosť výfukových plynov pôsobiach na turbínu (pozícia 1). Turbína je navrhnutá na maximálny hmotnostný tok a geometria lopatiek približne na stred regulovanej oblasti. Výfukové plyny prúdia so stálym hmotnostným tokom cez lopatky, ale pri rôznych absolútnych rýchlostiach  $c$  prietoku spalín, ktoré sú ovplyvnené uhlom natočenia lopatiek. Pri nízkych otáčkach, kedy je potrebný maximálny plniaci tlak  $p_{pl}$ , sú lopatky privreté. Prietokná plocha je zmenšená a rýchlosť výfukových plynov sa zvyšuje a turbína je roztočená na vysoké otáčky. Kompresor spojený s turbínou cez hriadeľ získava rovnako vysoké otáčky a zvyšuje hodnotu plniaceho tlaku. Pri vyšších otáčkach motoru, kedy už ďalšie zvýšenie plniaceho tlaku nie je potrebné, lopatky sa pootvoria a prietokná plocha sa zväčší, rýchlosť spalín sa zmenší, a to má za následok zníženie otáčok turbíny. Ovládanie lopatiek umiestnených na riadiacom krúžku (pozícia 4) je riadené aktuátorom (pozícia 3). Aktuátor je ovládaný pneumatickým alebo častejšie používaným elektrickým spôsobom. [2] [4] [20] [21]



Obrázok 12 Vplyv uhla lopatiek na rýchlosť spalín [17]



Obrázok 13 Zvýšenie rýchlosti spalín [21]



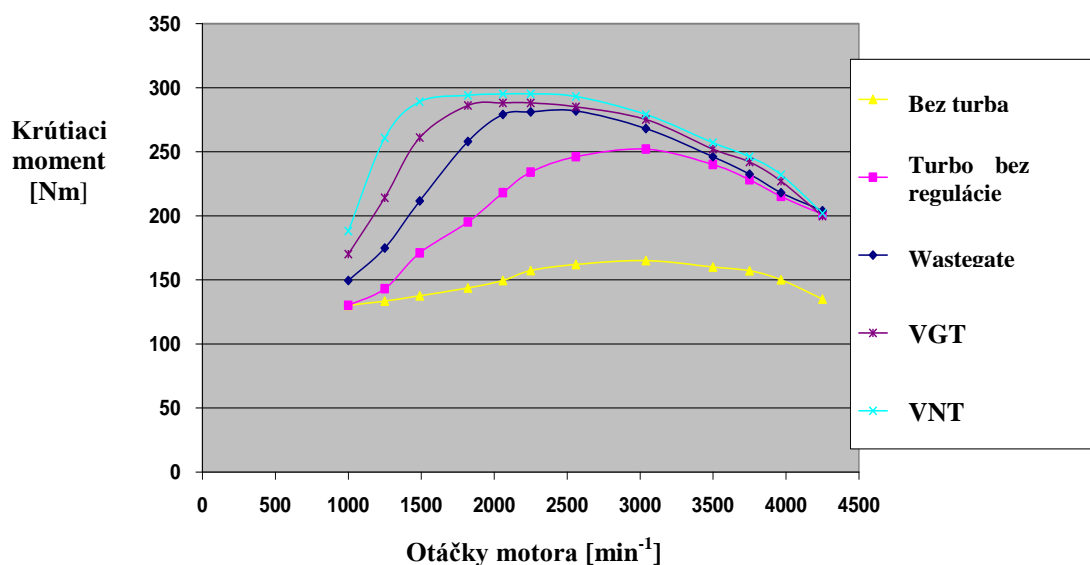
Obrázok 14 Zníženie rýchlosti spalín [21]



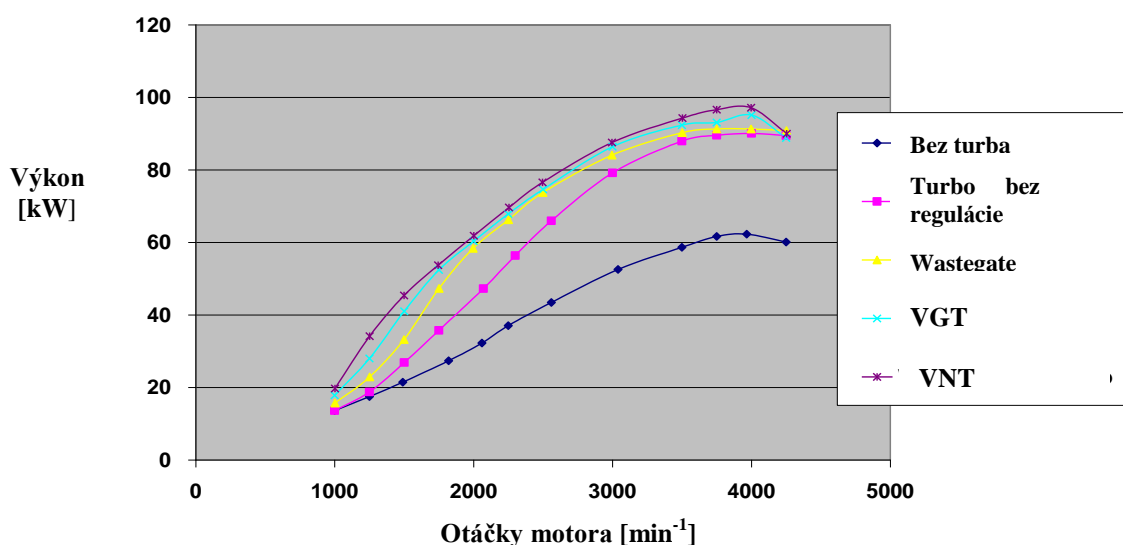
### 3.2 POROVNANIE SPÔSOBOV REGULOVANIA

Na grafoch 8 a 9 je porovnanie priebehu krútiaceho momentu a výkonu na motore s objemom 2,2 litra s rôznymi druhmi regulovania turbodúchadla v porovnaní s motorom bez turbodúchadla a s neregulovaným turbodúchadlom. Je patrné, že regulácia preplňovania má priaznivý vplyv na zvyšovanie výkonnostných charakteristík motora. Z otáčkovej charakteristiky je možné vyčítať silnú výhodu regulácie pomocou natáčania lopatiek statoru turbíny.

Táto regulácia nám zvyšuje hodnotu krútiaceho momentu a posúva ju do hodnôt nižších otáčok, čo vyplýva z momentovej charakteristiky na grafe 8. Vzhľadom k výhodám tejto technológie sa v súčasnej dobe kladie veľký dôraz na zdokonaľovanie tohto mechanizmu. [4]



Graf 8 Porovnanie točivého momentu pri rôznych spôsoboch regulovania [4]



Graf 9 Porovnanie výkonu pri rôznych spôsoboch regulovania [4]





Kapitoly 5-9 sú predmetom utrajenia informácií.



## ZÁVER

Práca bola zameraná na vytvorenie analytického matematického modelu, ktorý popisuje kinematiku mechanizmu rozvádzacích lopatiek turbodúchadla. Mechanizmus je definovaný pomocou polohy všetkých jeho členov. V prvom kroku som podľa matematických vzťahov určil základný model, ktorý je definovaný presne podľa daných hodnôt a aktuátor je nastavený na potrebné dorazy. V ďalšom výpočte bola uvažovaná zmena jednotlivých parametrov, ktorá mohla byť spôsobená opotrebením, chybou pri výrobe, alebo ďalšími faktormi. Výpočet pri danej zmene prebieha vysunutím aktuátora z nastavených hodnôt, takže vplyvom zmeny parametra je možné sledovať dôležité parametre (minimálna vzdialenosť lopatiek, dotyk lopatiek, dotyk vonkajšej kľuky na kalibračnú skrutku, atď.) Veľkosť zmeny je pre každý faktor rovnaká z dôvodu vzájomného hodnotenia. Zmena je daná dĺžkovým parametrom, ktorý je pre uhlové hodnoty prepočítany na zmenu uhla.

Najdôležitejším sledovným parametrom je medzera medzi lopatkami. Ako je spomenuté v úvodnej rešeršnej časti, prúd spalín pôsobiach na turbínové koleso je regulovaný naklápaním lopatiek a zmenou ich vzájomnej vzdialenosti. Pri malej vzájomnej vzdialenosti sa rýchlosť spalín zvyšuje a turbínové koleso sa rýchlejšie roztočí. Výsledky poukazujú, že pre maximálne otvorenie aktuátora je vypočítaná veľkosť zmeny otvorenia lopatiek k veľkosti zmeny všetkých faktorov. Správnosť výpočtu je overená v programe. Vysunutie aktuátora má najväčší vplyv na každý parameter.

Ďalšie sledované parametre mechanizmu sa menili rovnomerne a pri niektorých parametroch je sledovaná nelinearita.

Model je možné považovať za poloautomatický výpočet. Ďalším krokom by bolo aplikovanie nelineárnych diferenciálnych rovníc pre detailnejšiu analýzu.

Použitím pokročilých funkcií Minitab-u som získal na základe vplyvov všetkých zmien optimalizačnú tabuľku, ktorá je nastavená pre dodržanie minimálnej vzdialenosti lopatiek. Tabuľka navrhuje polohu členov mechanizmu pre dodržiavanie Intervane, ktoré požadujeme.

Záverečná časť sa týka interných síl v mechanizme, ktoré pôsobia na tiahlo aktuátora. Sily sú uvažované statické a bez trenia. Cieľom bolo zistiť, ktorá konfigurácia členov je najlepšia z hľadiska namáhania. Vnútoraná kinematika mechanizmu je daná, tak bolo potreba určiť polohu aktuátora vzhľadom k zástavbovým rozmerom. Pomer sily na tiahlo ku pomeru silu na rameno lopatky by mala byť 1. To znamená, že aktuátor v danej polohe dokáže najlepšie ovládať mechanizmus z hľadiska silového rozloženia.



## POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] HOFMANN, Karel. *Turbodmychadla, vozidlové turbíny a ventilátory: Přepřínování spalovacích motorů*. Praha: SNTL, 1985. 134s.
- [2] HOFMANN, Karel. *Alternativní pohony*. [online]. Studijní opory, VUT FSI Brno. 73 s. [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: <<http://www.iae2.fme.vutbr.cz/opory/Alt.pohony.pdf>>.
- [3] BARTONÍČEK, Ladislav. *Přepřínování pístových spalovacích motorů*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2004, 77 s. ISBN 80-7083-800-0.
- [4] HORNER, Brian. *Turbo Overview*. Mexicali: Honeywell, 2004.
- [5] BEROUNSKÝ, Pavel. *Turbodmychadlo*. [online]. Posledná revízia 2008 [cit.2013-02-05]. Dostupné z: <<http://www.turboberounsky.cz/?page=5>>.
- [6] *Turbodmychadlo I*. [online]. Posledná revízia 6.10.2008 [cit.2013-02-05]. Dostupné z: <<http://www.autoznalosti.cz/index.php/motor/8-turbodmychadlo.html>>.
- [7] *Turbodmychadlo II*. [online]. Posledná revízia 7.10.2008 [cit.2013-02-05]. Dostupné z: <<http://www.autoznalosti.cz/index.php/motor/9-turbodmychadlo.html>>.
- [8] HORNER, Brian. *Matching Overview*. Mexicali: Honeywell, 2004.
- [9] SAJDL Jan. *Downsizing motoru* [online]. [cit.2013-02-05]. Dostupné z: <<http://cs.autolexicon.net/articles/downsizing-motoru/>>.
- [10] *Spalovací motory*. [online]. Studijní opory, VUT FSI Brno. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: <<http://www.iae2.fme.vutbr.cz/opory/Spalovaci.motory.2005.pdf>>.
- [11] *Surge Line*. [online]. [cit.2013-02-20]. Dostupné z: <[http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/surge\\_line](http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/surge_line)>.
- [12] *Basic*. [online]. [cit.2013-02-20]. Dostupné z: <<http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/basic>>.
- [13] *Turbo Fundamentals*. [online]. [cit.2013-02-20]. Dostupné z: <<http://turbo.honeywell.com/turbo-basics/turbo-fundamentals/>>.
- [14] *Journl Bearings vs. Ball Bearings*. [online]. [cit.2013-02-20]. Dostupné z: <[http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/journal\\_bearings\\_vs\\_ball\\_bearings](http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/journal_bearings_vs_ball_bearings)>.
- [15] *Turbo Advantage*. [online]. [cit.2013-02-20]. Dostupné z: <<http://www.honeywell.com/sites/servlet/com.merx.npoint.servlets.DocumentServlet?docid=D0C6939E6-E33A-474A-5846-168A42869844&userID=npointadmin>>.
- [16] *740902-0009*. [online]. [cit.2013-02-20]. Dostupné z: <<http://www.turbosbytm.com/turbine-housing-gt30063-t3-v-clamp>>.



- [17] *Zvyšování výkonu, Turbodmychadla*. [online]. Studijní opory, VUT FSI Brno. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: <[http://www.iae2.fme.vutbr.cz/opory/přislusenstvi/prisl\\_prez\\_2007/zvys\\_vykonu\\_turbodmychadla.ppt](http://www.iae2.fme.vutbr.cz/opory/přislusenstvi/prisl_prez_2007/zvys_vykonu_turbodmychadla.ppt)>.
- [18] *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-03-04]. *Turbocharger*. Dostupné z: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Turbocharger>>.
- [19] *VNT*. [online]. [cit.2013-03-20]. Dostupné z: <<http://www.turboservis.rs/?eng,vnt>>.
- [20] *Variable turbine geometry (VTG)*. [online]. [cit.2013-03-20]. Dostupné z: <<http://www.3k-warner.de/products/vtg.aspx>>.
- [21] *How does Variable Turbine Geometry work?*. [online]. [cit.2013-03-20]. Dostupné z: <<http://paultan.org/2006/08/16/how-does-variable-turbine-geometry-work/>>.
- [22] *Turbocharging*. [online]. [cit.2013-03-20]. Dostupné z: <[http://www.autozine.org/technical\\_school/engine/Forced\\_Induction\\_2.html](http://www.autozine.org/technical_school/engine/Forced_Induction_2.html)>.
- [23] *VNT<sup>TM</sup> Turbochargers*. [online]. [cit.2013-04-05]. Dostupné z: <<http://turbo.honeywell.com/our-technologies/vnt-turbochargers/>>.
- [24] ESPASA, Olivier. *Passenger Vehicle VNT-Introduction*. Honeywell, 2009.
- [25] WILSON, John. *Commercial Vehicle VNT-Introduction*. Honeywell, 2012.
- [26] AGUILAR, Scott. *Double Axle VNT*. Honeywell, 2009.
- [27] *TURBOCHARGER ACTUATOR TESTER VNTT-1 (VERSION 4)*. [online]. [cit.2013-04-05]. Dostupné z: <<http://www.auto-testers.com/index.php?id=vntt1>>.
- [28] *User Guides*. [online]. [cit.2013-04-05]. Dostupné z: <[http://www.minitab.com/uploadedFiles/Shared\\_Resources/Documents/MeetMinitab/EN16\\_MeetMinitab.pdf](http://www.minitab.com/uploadedFiles/Shared_Resources/Documents/MeetMinitab/EN16_MeetMinitab.pdf)>.
- [29] HALLOWELL, David. *DOE in Software Testing: The Potential and the Risks*, [online]. Posledná revízia 26.2.2012 [cit.2013-02-05]. Dostupné z: <<http://www.isixsigma.com/tools-templates/design-of-experiments-doe/doe-software-testing-potential-and-risks/>>.
- [30] SAJDL, Jan. *Emisní norma EURO*. [online]. [cit.2013-02-05]. Dostupné z: <<http://cs.autolexicon.net/articles/emisni-norma-euro/>>.
- [31] *Drawing a central composite design*. [online]. [cit.2013-02-05]. Dostupné z: <<http://tex.stackexchange.com/questions/74996/drawing-a-central-composite-design>>.



## Zoznam Použitých Skratiek a Symbolov

$H_u$	[J.kg <sup>-1</sup> ]	dolná výhrevnosť použitého paliva
$M_i$	[kg]	množstvo skutočne privedeného vzduchu
$M_{lo}$	[kg]	množstvo teoreticky potrebného vzduchu
$M_{pl}$	[kg]	hmotnostná dávka paliva na jeden cyklus
$m_z$	[kg]	hmotnosť náplne
$n$	[Hz]	otáčky motora
$P$	[-]	hodnota pravdepodobnosti vplyvu faktora
$P_{1t}$	[Pa]	tlak pred turbínou
$p_{1z}$	[Pa]	tlak na konci plnenia
$p_e$	[Pa]	stredný efektívny tlak na piest
$P_e$	[W]	efektívny výkon
$p_i$	[Pa]	stredný indikovaný tlak
$p_m$	[Pa]	stredný tlak strát
$p_{pl}$	[Pa]	tlak čerstvej náplne valca
$p_v$	[Pa]	tlak výfukových plynov
$P-V$	[-]	závislosť tlaku na objeme
$Q_i$	[J]	indikovaná práca cyklu
$Q_p$	[J]	teplo privedené k palivu
$r$	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	merná plynová konštanta vzduchu
$T_{1z}$	[K]	teplota na konci plnenia
$T_{pl}$	[K]	teplota plniaceho vzduchu pred sacím ventilom
$T_{pl}$	[K]	teplota čerstvej náplne valca
$T_v$	[K]	teplota výfukových plynov za výfukovým ventilom
VG	[-]	Variable-Geometry Turbocharger
$V_H$	[m <sup>3</sup> ]	zdvihový objem jedného valca
VNT	[-]	Variable Nozzle Turbine
VTG	[-]	Variable-Turbine Geometry
$V_z$	[m <sup>3</sup> ]	zdvihový objem jedného valca preplňovaného motora
$\eta_i$	[-]	indikovaná účinnosť motora
$\eta_m$	[-]	mechanická účinnosť motora
$\eta_{pl}$	[-]	plniaca účinnosť motora
$\lambda$	[-]	súčiniteľ prebytku vzduchu



$\lambda_{pr}$	[-]	preplachovací súčiniteľ prebytku vzduchu
$\lambda_z$	[-]	spaľovací súčiniteľ prebytku vzduchu
$\lambda_z$	[-]	spaľovací súčiniteľ prebytku vzduchu
$\rho_{pl}$	[kg.m <sup>3</sup> ]	hustota plniaceho vzduchu
$\sigma_t$	[-]	teoretický zmiešavací pomer vzduchu a paliva
$\tau$	[-]	taktnosť motora (pre dvojdobý motor $\tau = 1$ , pre štvordobý motor $\tau = 2$ )
<i>EGR</i>	[-]	Exhaust Gas Recirculation